

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION  
EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété  
Intellectuelle  
Bureau international



(43) Date de la publication internationale  
7 juillet 2005 (07.07.2005)

PCT

(10) Numéro de publication internationale  
**WO 2005/061991 A1**

(51) Classification internationale des brevets<sup>7</sup> :  
**G01C 19/56**, B81B 3/00, H03H 9/24

(21) Numéro de la demande internationale :  
PCT/FR2004/003203

(22) Date de dépôt international :  
13 décembre 2004 (13.12.2004)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :  
0314973 19 décembre 2003 (19.12.2003) FR

(71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) : **COM-  
MISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE** [FR/FR];  
31-33, rue de la Fédération, F-75752 Paris (FR).

(72) Inventeur; et

(75) Inventeur/Déposant (pour US seulement) : **DELEVOYE,  
Elisabeth** [FR/FR]; 33, rue Abbé Grégoire, F-38000  
Grenoble (FR).

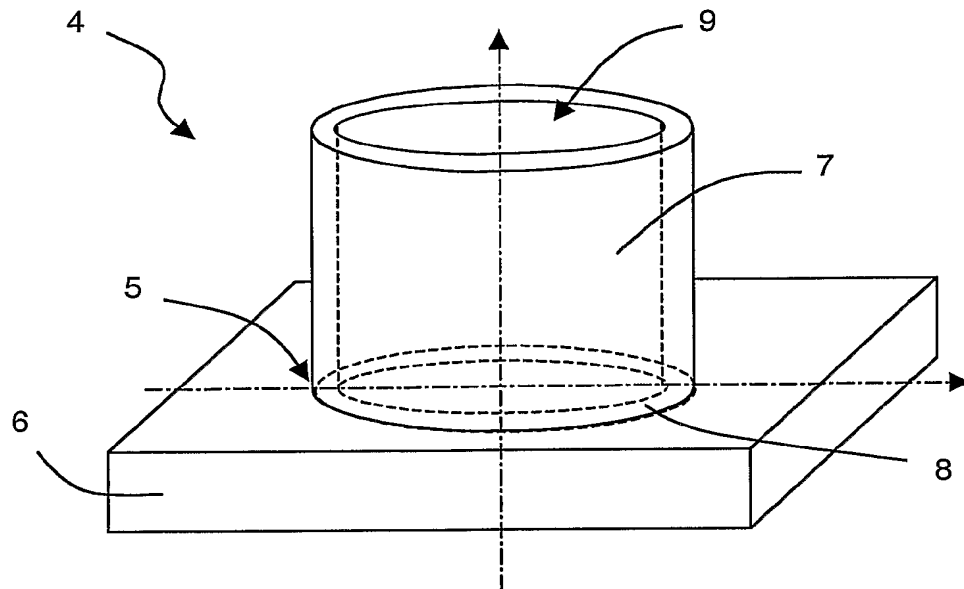
(74) Mandataires : **HECKE, Gérard** etc.; Cabinet Hecke,  
WTC Europole, 5, Place Robert Schuman - BP 1537,  
F-38025 Grenoble Cedex 1 (FR).

(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de  
protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AT,  
AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO,  
CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB,  
GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG,  
KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG,  
MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG, PH,  
PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN,  
TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

[Suite sur la page suivante]

(54) Title: MICRO-MACHINED VIBRATING STRUCTURE AND ASSOCIATED MICRO-GYROSCOPE

(54) Titre : STRUCTURE VIBRANTE MICRO-USINEE ET MICROGYROMETRE ASSOCIE



(57) Abstract: The invention relates to a micro-machined, vibrating structure (4), comprising a fixing end (5), connected to a fixed support (6) and a hollow shell, preferably in a cylindrical form with a lateral wall (7), forming a vibrating wall (7) of the vibrating structure (4), in which progressive or stationary waves are generated. The hollow shell comprises a base (8), forming the fixing end (5) for the vibrating structure (4) and a free end (9). A naturally decoupled region is arranged between the fixing end (5) and the free end (9) of the hollow shell.

[Suite sur la page suivante]

WO 2005/061991 A1



(84) **États désignés** (sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasién (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

— avant l'expiration du délai prévu pour la modification des revendications, sera republiée si des modifications sont reçues

En ce qui concerne les codes à deux lettres et autres abréviations, se référer aux "Notes explicatives relatives aux codes et abréviations" figurant au début de chaque numéro ordinaire de la Gazette du PCT.

**Publiée :**

— avec rapport de recherche internationale

(57) **Abrége :** La structure vibrante (4) micro-usinée comporte une extrémité d'ancrage (5), solidaire d'un support fixe (6), et une coque creuse, de préférence, de forme cylindrique ayant une paroi latérale, constituant une paroi vibrante (7) de la structure vibrante (4), dans laquelle sont générées des ondes progressives ou stationnaires. La coque creuse comporte une base (8), constituant l'extrémité d'ancrage (5) de la structure vibrante (4), et une extrémité libre (9). Une zone naturellement découplée est située entre l'extrémité d'ancrage (5) et l'extrémité libre (9) de la coque creuse.

## **Structure vibrante micro-usinée et microgyromètre associé**

### **Domaine technique de l'invention**

L'invention concerne une structure vibrante micro-usinée comportant une extrémité d'ancrage, solidaire d'un support fixe, et au moins une paroi vibrante, dans laquelle sont générées des ondes progressives ou stationnaires et comportant une base et une extrémité libre, la paroi vibrante étant constituée par une paroi latérale d'une coque creuse.

L'invention concerne également un microgyromètre utilisant la structure vibrante.

### **État de la technique**

Les résonateurs vibrants sont employés dans des domaines très divers, comme les capteurs ou les actionneurs. Une structure vibrante constitue l'élément principal d'un résonateur vibrant et comporte des moyens d'ancrage à un support fixe. Dans les structures vibrantes connues, ces moyens d'ancrage provoquent une perte d'énergie dans le support fixe et peuvent générer, par exemple, une perturbation du mouvement, ce qui réduit les performances du résonateur vibrant. Par une conception spécifique en trois dimensions de la structure vibrante, l'énergie de déformation peut être concentrée vers une extrémité de la structure, appelée extrémité libre. Le dimensionnement est étudié pour que l'amplitude de déformation évolue progressivement en se réduisant de l'extrémité libre vers l'extrémité d'ancrage de la structure. Une partie de la structure vibrante, proche de l'extrémité d'ancrage, est assimilable à

un nœud de déformation non ponctuel restant invariant en rotation et formant une zone de découplage sur laquelle peuvent être placés les moyens d'ancrage. Ainsi, les perturbations qui affectent les moyens d'ancrage ne sont pas transmises au système d'ondes engendrées par la vibration. La zone d'ancrage est donc naturellement découplée de la structure vibrante.

Les performances d'un résonateur vibrant déterminent en partie les performances de l'appareil dans lequel il est utilisé. Les qualités principales d'un résonateur sont les suivantes :

- une maîtrise des modes de vibration et de la pureté des fréquences de résonance, ce qui implique des contraintes de symétrie et de contrôle de la fabrication de la structure vibrante,
- une insensibilité aux perturbations extérieures, ce qui suppose des structures vibrantes avec des configurations anti-symétriques parfaites ou des configurations symétriques,
- un coefficient de qualité (finesse de la réponse en fréquence et gain élevé), obtenu en associant la fonction de découplage entre le support fixe et la structure vibrante,
- une insensibilité aux paramètres d'environnement, ce qui implique des structures vibrantes avec des moyens d'ancrage présentant une bonne disposition à minimiser les effets des variations d'environnement.

Il a déjà été proposé d'employer un résonateur vibrant comme gyromètre. De nombreux documents concernent les gyromètres, notamment le calcul de leurs dimensions et l'évaluation de leurs performances. Le principe d'un gyromètre est le même quelle que soit sa forme. Lorsque la structure vibrante du gyromètre est mise en rotation, une force de Coriolis s'exerce sur les parois vibrantes de la structure et modifie alors son état d'équilibre. Cette force de Coriolis résulte de la vitesse de l'onde et de la vitesse de rotation à mesurer. La

symétrie parfaite de la structure vibrante permet d'avoir, pour chaque mode de résonance, un second mode équivalent à 45 degrés du premier. Les modes d'excitation et de détection du résonateur sont donc parfaitement couplés et excités à leur fréquence de résonance.

Les figures 1 et 2 représentent, respectivement en coupe et en vue de dessus, la structure vibrante actuellement la plus performante pour un gyromètre, grâce à sa symétrie parfaite et à son dimensionnement spécifique. C'est la structure vibrante hémisphérique HRG (« Hemispherical Rate Gyro »), qui repose sur le principe du verre à pied. Elle se compose d'un corps vibrant 1 en forme de demi-sphère creuse, ancrée sur un pied 2 solidaire d'un support fixe 3. Les avantages d'une telle géométrie sont les suivants :

- la forme de révolution en trois dimensions est favorable à la génération d'ondes stationnaires faciles à calculer et à stabiliser,
- la forme en demi-sphère du corps vibrant 1 crée un nœud de déformation absolu à l'ancrage de la structure, qui est le seul nœud spécifique à rester invariant en rotation.

Le corps vibrant 1 de cette structure est donc constamment et naturellement découplé de son support fixe 3, grâce à la présence du pied 2. Cependant, cette structure vibrante n'est pas adaptée aux technologies de micro-usinage. Particulièrement pour la fabrication d'un microgyromètre, l'usinage précis d'une demi-sphère est complexe et coûteux en usinage standard et impossible en micro-usinage.

Le document WO-A-9922203 décrit une structure vibrante reposant sur un principe analogue mais avec un corps vibrant 1 creux, de forme cylindrique (figure 3), ancré sur le pied 2. La paroi du corps vibrant 1 est alors parfaitement

verticale. Cette structure est avantageuse du point de vue technologique car le micro-usinage d'un cylindre est facile.

Cependant, les performances d'une structure vibrante cylindrique portée par un pied ne sont pas satisfaisantes, car elles ne se rapprochent pas des performances optimales de la structure vibrante hémisphérique selon la figure 1. Ce type de gyromètre avec une structure vibrante de forme cylindrique est donc intéressant en termes de micro-usinage, mais pas en termes de performances de résonateur.

### **Objet de l'invention**

L'objet de l'invention consiste à réaliser une structure vibrante ne présentant pas ces inconvénients et, en particulier, une structure vibrante adaptée aux technologies de micro-usinage et permettant d'assurer un découplage naturel, en termes de propagation des ondes, entre la paroi vibrante et la partie d'ancrage.

Selon l'invention, ce but est atteint par les revendications annexées et, plus particulièrement, par le fait que l'extrémité d'ancrage est constituée par la base de la coque creuse, une zone naturellement découplée étant située entre l'extrémité d'ancrage et l'extrémité libre de la paroi vibrante.

L'invention concerne également un migrogyromètre comportant une telle structure vibrante, et comportant des électrodes formées dans le même substrat que la paroi vibrante de la structure vibrante.

## **Description sommaire des dessins**

D'autres avantages et caractéristiques ressortiront plus clairement de la description qui va suivre de différents modes particuliers de réalisation de l'invention donnés à titre d'exemples non limitatifs et représentés aux dessins annexés, dans lesquels :

Les figures 1 à 3 représentent en coupe (figures 1 et 3) et en vue de dessus (figure 2) deux structures vibrantes selon l'art antérieur.

Les figures 4 et 5 représentent un mode particulier de réalisation d'une structure vibrante selon l'invention, respectivement en perspective et en coupe verticale.

Les figures 6 à 12 sont des vues en coupe de différents modes de réalisation de la paroi vibrante d'une structure vibrante selon les figures 4 et 5.

Les figures 13 à 15 sont des vues en coupe de trois variantes de réalisation de la base de la paroi vibrante selon les figures 6 à 12.

Les figures 16 à 20 illustrent des modes particuliers de fabrication de la structure vibrante selon l'invention.

Les figures 21 à 25 illustrent plusieurs modes de réalisation d'un microgyromètre comportant une structure vibrante selon l'invention.

## **Description de modes particuliers de réalisation**

Selon l'invention, la structure vibrante d'un microgyromètre à base d'ondes progressives et stationnaires a une géométrie spécifique. La structure vibrante, particulièrement adaptée aux technologies de micro-usinage, est conçue de façon à comporter une zone naturellement découplée, dans laquelle peu d'énergie se dissipe. Les moyens d'ancrage sont localisés dans cette zone de

manière à éviter qu'ils influencent le comportement de la structure vibrante. Le pied des structures vibrantes selon l'art antérieur est ainsi supprimé.

La figure 4 représente un mode particulier de réalisation d'une structure vibrante selon l'invention. La structure vibrante 4 comporte une extrémité d'ancrage 5 sur un support fixe 6 et une paroi vibrante 7, avec une base 8 et une extrémité libre 9. La paroi vibrante 7 est constituée par une coque creuse de forme cylindrique. La base 8 de la coque creuse constitue l'extrémité d'ancrage 5 de la structure vibrante 4. Des ondes progressives ou stationnaires sont générées sur la partie utile de la paroi vibrante 7. Contrairement aux structures vibrantes connues illustrées aux figures 1 à 3, la structure vibrante 4 ne comporte pas de pied. Elle comporte une zone naturellement découplée au niveau de l'extrémité d'ancrage 5 de la paroi vibrante 7, obtenue par le dimensionnement de la paroi vibrante 7.

La figure 5 illustre cette conception particulière de la paroi vibrante 7. Elle représente une vue en coupe verticale de la structure vibrante 4 selon la figure 4. La paroi vibrante 7 a une hauteur  $H$ , tandis que la partie utile de la paroi vibrante 7, dans laquelle sont générées et analysées les ondes, a une hauteur  $h'$ . La partie d'ancrage, correspondant à la zone naturellement découplée, a une hauteur  $h$  ( $h + h' = H$ ). Plus la hauteur  $h$  est petite, plus la hauteur  $h'$  est grande et plus les caractéristiques de la vibration sont améliorées. Cependant la hauteur  $h$  doit toujours être supérieure à une hauteur  $h_c$ , correspondant à la hauteur de la zone d'influence des contraintes engendrées par le support fixe 6. En effet, plus la hauteur  $h$  est petite, moins la partie utile est découplée du support fixe 6 et plus la vibration risque d'être perturbée. Les dimensions de la paroi vibrante 7 doivent donc être choisies pour optimiser les performances de la structure vibrante 4.



D'autres variantes de réalisation sont illustrées aux figures 6 à 13, qui représentent, en coupe, différentes formes d'une paroi vibrante 7 dont la base 8 a une section interne circulaire (figure 13).

Sur la figure 6, la paroi vibrante 7 a une forme cylindrique, l'épaisseur  $e$  de la paroi vibrante 7 restant constante de l'extrémité libre 9 à l'extrémité d'ancrage 5.

La figure 7 représente une paroi vibrante 7 ayant une face externe de forme tronconique. Le rayon interne  $R$  de la coque creuse reste constant (la face interne de la paroi vibrante 7 est donc de forme cylindrique) et l'épaisseur  $e$  de la paroi vibrante 7 évolue d'une première valeur  $e_1$  à l'extrémité libre 9 à une deuxième valeur  $e_2$ , supérieure à  $e_1$ , à l'extrémité d'ancrage 5.

Dans la variante de réalisation selon la figure 8, la paroi vibrante 7 est de forme tronconique, avec une épaisseur  $e$  constante. Le rayon interne  $R$  de la paroi vibrante 7 évolue d'une première valeur  $R_1$  à l'extrémité libre 9 à une deuxième valeur  $R_2$ , inférieure à  $R_1$ , à l'extrémité d'ancrage 5.

La figure 9 représente une paroi vibrante 7 de forme externe cylindrique, avec une face interne de forme tronconique. L'épaisseur  $e$  de la coque creuse évolue d'une première valeur  $e_1$  à l'extrémité libre 9 à une deuxième valeur  $e_2$ , supérieure à  $e_1$ , à l'extrémité d'ancrage 5, tandis que le rayon interne  $R$  de la coque creuse évolue d'une première valeur  $R_1$  à l'extrémité libre 9 à une deuxième valeur  $R_2$ , inférieure à  $R_1$ , à l'extrémité d'ancrage 5.

La figure 10 représente une paroi vibrante 7 de forme externe cylindrique, dont l'épaisseur  $e$  évolue d'une première valeur  $e_1$  à l'extrémité libre 9 à une deuxième valeur  $e_2$ , supérieure à  $e_1$ , à l'extrémité d'ancrage 5. Le rayon interne  $R$  de la coque creuse évolue d'une première valeur  $R_1$  à l'extrémité libre 9 à une

deuxième valeur  $R_2$ , inférieure à  $R_1$ , à l'extrémité d'ancrage 5. Dans cet exemple de réalisation, contrairement aux parois vibrantes selon les figures 7 et 9 dans lesquelles l'évolution de l'épaisseur  $e$  se fait de manière linéaire, cette évolution est non-linéaire et la face interne de la coque creuse est incurvée au niveau de l'extrémité d'ancrage 5.

La figure 11 représente une paroi vibrante 7 de forme externe tronconique, dont l'épaisseur  $e$  évolue de manière linéaire, de manière à ce que la face interne de la paroi vibrante 7 soit également de forme tronconique. L'épaisseur  $e$  de la coque creuse évolue ainsi d'une première valeur  $e_1$  à l'extrémité libre 9 à une deuxième valeur  $e_2$ , supérieure à  $e_1$ , à l'extrémité d'ancrage 5, tandis que le rayon interne  $R$  de la coque creuse évolue d'une première valeur  $R_1$  à l'extrémité libre 9 à une deuxième valeur  $R_2$ , inférieure à  $R_1$ , à l'extrémité d'ancrage 5.

La figure 12 représente une paroi vibrante 7 dont l'épaisseur  $e$  évolue de manière non-linéaire. L'épaisseur de la paroi vibrante 7 conserve, à partir de l'extrémité libre 9 et sur sensiblement la moitié de la hauteur  $H$ , une première valeur  $e_1$  et évolue ensuite jusqu'à une deuxième valeur  $e_2$ , supérieure à  $e_1$ , à l'extrémité d'ancrage 5. Le rayon interne  $R$  évolue également de manière non-linéaire d'une première valeur  $R_1$ , à l'extrémité libre 9 et sur sensiblement la moitié de la hauteur  $H$ , à une deuxième valeur  $R_2$ , inférieure à  $R_1$ , à l'extrémité d'ancrage 5.

Sur toutes les figures décrites précédemment, la hauteur  $H$ , correspondant à la profondeur de la paroi vibrante 7 est invariante, quelle que soit la forme de la structure vibrante 4. Le micro-usinage est ainsi facilité, ce qui réduit le coût de fabrication.

La structure vibrante 4 selon les figures 6 et 13, c'est-à-dire avec une paroi vibrante 7 de forme cylindrique et d'épaisseur constante, est la plus simple possible en termes de fabrication. Comme illustré aux figures 7 à 12, il est possible de faire évoluer l'épaisseur  $e$  de la paroi vibrante 7 le long de la hauteur  $H$ , d'une première valeur  $e_1$  au niveau de l'extrémité libre 9 vers une seconde valeur  $e_2$  au niveau de l'extrémité d'ancrage 5 (figures 7, 9-12). L'épaisseur  $e$  de la paroi latérale peut varier linéairement (figures 7, 9 et 11) ou non (figure 10). Il est ainsi possible d'obtenir une grande efficacité de découplage sur une profondeur  $H$  faible.

Bien que la base 8 de la paroi vibrante 7 selon les figures 6 à 13 soit circulaire, de rayon interne  $R$  et d'épaisseur  $e$ , l'invention s'applique également à des parois vibrantes 7 dont la base 8 a une section non circulaire. En effet, il est possible de dessiner des géométries quelconques sur les masques de gravure, dans le cas de gravure à l'aide de gaz réactifs. À titre d'exemple, comme représenté à la figure 14, la base 8 peut être de forme elliptique, avec une épaisseur  $e$  et des paramètres caractéristiques  $a$  et  $b$ , respectivement pour le petit axe et pour le grand axe de la section interne de la paroi vibrante 7. Selon la figure 15, la base 8 peut également être constituée par un anneau de forme rectangulaire de longueur  $L$ , de largeur  $l$  et d'épaisseur  $e$ .

L'optimisation des dimensions d'une structure vibrante 4 selon les figures 4 et 5 fait appel à des formulations mathématiques connues pour le calcul des structures des coques cylindriques. Ces formulations peuvent cependant être appliquées à des formes beaucoup plus diverses, notamment à toutes les coques creuses selon les figures 7 à 12. Dans ce cas, il est possible, soit d'écrire et de résoudre analytiquement le système d'équations correspondant, soit d'utiliser les méthodes numériques de résolution par éléments finis, si les structures sont trop complexes.

Les équations de déformation et de vibration des coques sont décrites de façon très générale dans la publication de Y.M. Fu et C.P. Chen s'intitulant « Non-linear vibration of elastic truncated conical moderately thick shells in large overall motion » (International Journal of Non-Linear Mechanics ; July 2001 ; 36 (5) ; pp 763-771). Le calcul de Fu & Chen décrit le comportement vibratoire d'une structure à coque tronconique. Ce calcul peut être adapté pour une coque cylindrique, notamment pour le calcul de l'épaisseur de la paroi du cylindre où se produisent les vibrations près de l'extrémité libre 9. La forme de la structure vibrante 4 est alors déduite par l'association, du calcul décrit dans la publication de Fu & Chen, du choix des épaisseurs de la paroi vibrante 7 de la coque creuse et du calcul des rayons de la base 8 et de l'extrémité libre 9 de la coque creuse.

La structure vibrante 4 peut être réalisée par simple gravure dans un substrat, par exemple un substrat en silicium (Si), en silicium sur isolant (SOI), ou un substrat surmonté de couches secondaires épitaxiées. L'épaisseur du substrat fixe la hauteur H maximale de la structure vibrante 4. La paroi vibrante 7 et le support fixe 6 sont ainsi constitués par une seule pièce. Selon la forme de la structure vibrante 4, la gravure peut être réalisée en une seule fois, avec un seul niveau de masquage, ou en plusieurs étapes avec plusieurs niveaux de masquage, les gravures déjà effectuées étant alors protégées par une couche sacrificielle, par exemple un diélectrique de type oxyde, nitrure ou résine épaisse, avant la gravure du niveau suivant. À titre d'exemple, une gravure anisotrope, de type RIE ("Reactive Ion Etching"), c'est-à-dire une gravure ionique réactive en une seule fois, peut être utilisée pour réaliser une paroi vibrante 7 à flancs parfaitement verticaux (figure 6), ou à flancs non verticaux (figures 12). Dans ce dernier cas, il suffit de modifier in situ les conditions de gravure pour passer d'une zone à la suivante.

Une paroi vibrante 7 selon la figure 10 peut être réalisée en deux étapes par une gravure isotrope humide ou de type RIE, suivie par une gravure anisotrope de type RIE.

La succession d'une gravure anisotrope humide, par exemple au moyen d'hydroxyde de potassium (KOH), et d'une gravure anisotrope de type RIE peut être utilisée pour réaliser une paroi vibrante 7 selon la figure 9 avec une base 8 carrée ou rectangulaire selon la figure 15.

De nombreuses autres combinaisons des différentes techniques de gravure peuvent être réalisées, permettant ainsi de réaliser un grand nombre de parois vibrantes 7 de formes différentes.

Différents modes de réalisation de la structure vibrante 4 vont être décrits au regard des figures 16 à 20, qui illustrent respectivement la fabrication de parois vibrantes 7 selon la figure 12 (figure 16), selon la figure 9 (figure 17) et selon la figure 6 (figures 18 à 20).

Sur la figure 16, la structure vibrante 4 est gravée dans un substrat 10 en silicium massif. Chaque étape de gravure se termine au bout d'un temps prédéterminé en fonction de la forme choisie. La partie inférieure du substrat 10 constitue alors le support fixe 6 de la structure vibrante 4.

Sur la figure 17, le substrat 10 en silicium massif comporte, à sa partie inférieure dans le mode de réalisation représenté, une zone surdopée 11, d'épaisseur sensiblement équivalente ou inférieure au tiers de l'épaisseur du substrat 10. Néanmoins, l'épaisseur de la zone surdopée 11 doit être suffisante pour que le substrat 10 reste suffisamment rigide. À titre d'exemple, l'épaisseur de la zone

surdopée est de l'ordre de 50µm à 100µm. La zone surdopée 11 est réalisée par implantation et recuit à partir d'une face du substrat 10 (face inférieure dans l'exemple représenté). La gravure de la face interne de la structure vibrante 4 est ensuite effectuée à partir de l'autre face, de préférence par gravure humide, par exemple au moyen d'une gravure KOH. En effet, les propriétés du surdopage local du substrat 10 sont alors utilisées pour créer automatiquement un arrêt de la gravure électrochimique au niveau de la zone surdopée 11. La zone surdopée 11 constitue ainsi le support fixe 6 de la structure vibrante 4.

Sur la figure 18, une couche 12 d'arrêt de la gravure est réalisée sous le substrat 10. La couche 12 est, de préférence, constituée par un diélectrique de type oxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ ), car il présente une bonne sélectivité par rapport au silicium et n'est pas une source de pollution des équipements. La structure vibrante 4 est ensuite gravée dans toute l'épaisseur du substrat 10 et la couche 12 d'arrêt de gravure constitue le support fixe 6 de la structure vibrante 4.

Sur la figure 19, le substrat 10 est un substrat en silicium sur isolant (SOI). Il comporte une couche intermédiaire 13 d'oxyde de silicium enterré ( $\text{SiO}_2$ ). La structure est gravée dans la partie épaisse du substrat 10 et l'arrêt de la gravure s'effectue sur la couche 13 d'oxyde de silicium enterré. La couche 13 constitue ainsi le support fixe 6 de la structure vibrante 4. Cette méthode de fabrication est particulièrement adaptée aux technologies de micro-usinage sur circuit intégré (« above IC »), dans lesquelles on fabrique d'abord le ou les circuits intégrés que l'on protège pendant que l'on poursuit par la fabrication du capteur ou de l'actionneur. En effet, un film mince 14 du substrat 10 de silicium situé sous la couche intermédiaire 13 permet l'intégration d'autres fonctions dans le composant ainsi constitué, par exemple des circuits intégrés de commande et/ou de lecture. Les contacts entre le film mince 14 et la partie épaisse du

substrat 10 sont réalisés par tout procédé connu approprié permettant de fixer les potentiels de la structure usinée.

Le mode de fabrication représenté à la figure 20 se distingue de celui représenté à la figure 19 par une étape supplémentaire de gravure de la couche 13 d'oxyde de silicium enterré. Cette gravure permet de diminuer les effets parasites et les contraintes entre le film mince 14 et la structure vibrante 4 gravée dans la partie épaisse du substrat 10. C'est alors le film mince 14 qui constitue le support fixe 6 de la structure vibrante 4.

Dans tous les cas, la coque creuse permet, malgré sa courte longueur, un découplage effectif de l'extrémité d'ancrage 5 par rapport à l'extrémité libre 9. La zone découplée n'est pas un nœud de déformation non ponctuel et l'extrémité d'ancrage 5 peut être solidaire, sur toute sa circonférence, du substrat 10 qui la supporte.

La structure vibrante 4 décrite ci-dessus présente, notamment les avantages suivants :

- elle permet confiner des ondes progressives dans sa partie utile,
- la perte d'énergie est négligeable dans son support fixe 6 et, au contraire, l'énergie apportée par les moyens d'excitation est concentrée dans sa partie utile,
- la réponse de la structure vibrante 4 est indépendante des conditions de contrainte qui se développent dans son support fixe 6 provenant des conditions d'assemblage, de l'usage de la structure ou des variations des variables d'environnement,
- la structure vibrante 4 est très compacte, ce qui permet le micro-usinage et réduit le coût de production.

La fabrication d'un microgyromètre comportant une structure vibrante selon l'invention va être décrite plus en détail au regard des figures 21 à 25.

Sur les figures 21 et 22, comme sur la figure 18, une couche d'oxyde 12 est réalisée sous le substrat 10 pour délimiter la zone d'arrêt de la gravure. La structure vibrante 4, par exemple de forme cylindrique, et des électrodes 15, disposées, par exemple, de part et d'autre de chaque paroi vibrante 7 de la structure vibrante 4, sont gravées simultanément de manière à former des blocs de silicium isolés entre eux. L'ensemble est complété par une métallisation 16 de surface des électrodes 15 et des parois vibrantes 7. Cette métallisation 16 sert à fixer le potentiel à la masse ou à un autre élément en fonction de l'application envisagée. La métallisation peut être réalisée soit sur la face arrière, à travers des ouvertures formées dans la couche d'oxyde 12 (figure 21), soit sur la face avant. Dans ce cas, une couche d'oxyde 18 à l'extrémité libre des électrodes 15 est formée pour obtenir une meilleure adhérence du métal 16 sur le silicium composant les électrodes 15 (figure 22). La métallisation 16 est réalisée, par exemple, par dépôt, masquage, lithographie et gravure sélective du substrat 10. Il est également possible de réaliser la métallisation 16 après les gravures profondes des parois vibrantes 7 de la structure vibrante 4 grâce à l'emploi d'un masque mécanique (non représenté) qui protège les zones ne devant pas être métallisées. Il est possible d'effectuer les gravures profondes du substrat 10 après la métallisation 16 en les protégeant si nécessaire par une couche sacrificielle (non représentée).

Le mode de réalisation représenté sur la figure 21 est préféré à celui représenté sur la figure 22, car tout autre matériau que le silicium, déposé sur la zone utile des électrodes 15, dégrade très fortement le coefficient de qualité du résonateur.



Il est ainsi possible de réaliser un microgyromètre avec un seul substrat 10. Il suffit ensuite de l'intégrer dans un boîtier, d'ajouter des moyens d'excitation de la structure vibrante 4 et de détection des ondes, et d'effectuer un câblage entre les électrodes 15 et le boîtier.

Dans une variante de réalisation représentée à la figure 23, deux substrats 10a et 10b, gravés et métallisés comme sur la figure 22, sont ensuite scellés par leurs faces oxydées 12a et 12b avant d'être disposés à l'intérieur d'un boîtier. Les deux substrats 10a et 10b sont ainsi disposés symétriquement par rapport à leurs faces oxydées 12a et 12b, qui constituent le support fixe des structures vibrantes 4a et 4b correspondantes. Le scellement peut être réalisé avant la gravure des parois vibrantes 7a et 7b et des électrodes 15a et 15b. La structure symétrique est ensuite incorporée dans un boîtier et associée à un câblage et des moyens d'excitation de la structure et de détection des ondes pour réaliser le microgyromètre. Une telle structure symétrique permet notamment de minimiser les contributions au bruit mécanique et de distinguer le signal recherché des signaux parasites.

De manière analogue, une structure symétrique peut être réalisée, comme représenté à la figure 24, avec des métallisations 16a et 16b sur les faces arrières des substrats 10a et 10b, entre les deux couches d'oxyde 12a et 12b, c'est-à-dire à partir de deux substrats du type représenté à la figure 21. Dans ce cas, un des deux substrats est gravé de façon à pouvoir effectuer un câblage 17 des différentes électrodes. Sur la figure 24, le substrat 10a est gravé à sa périphérie et un câblage 17 s'effectue en pourtour de la structure. Il est également possible d'effectuer un câblage 17 à la fois sur le pourtour de la structure et sur la partie centrale du substrat 10a (figure 25) ou uniquement sur la partie centrale (non représenté), pour obtenir un composant plus compact.

La résolution d'un gyromètre comportant une structure vibrante cylindrique selon l'invention peut être environ 100 fois supérieure à celle des gyromètres connus.

L'invention n'est pas limitée aux modes particuliers de réalisation décrits ci-dessus. En particulier, la structure vibrante peut être incorporée dans tout type de résonateur vibrant. Dans les structures symétriques, les électrodes des deux substrats ne sont pas obligatoirement connectées ensemble. Il est également possible d'insérer des surfaces de scellement indépendantes.

## Revendications

1. Structure vibrante micro-usinée comportant une extrémité d'ancrage (5), solidaire d'un support fixe (6), et au moins une paroi vibrante (7), dans laquelle sont générées des ondes progressives ou stationnaires et comportant une base (8) et une extrémité libre (9), la paroi vibrante (7) étant constituée par une paroi latérale d'une coque creuse, structure vibrante caractérisée en ce que l'extrémité d'ancrage (5) est constituée par la base (8) de la coque creuse, une zone naturellement découplée étant située entre l'extrémité d'ancrage (5) et l'extrémité libre (9) de la paroi vibrante (7).
2. Structure vibrante selon la revendication 1, caractérisée en ce que la paroi latérale de la coque creuse a une épaisseur (e) constante.
3. Structure vibrante selon la revendication 1, caractérisée en ce que la paroi latérale de la coque creuse a une épaisseur variable, d'une première valeur (e1) à l'extrémité libre (9) à une seconde valeur (e2), supérieure à la première (e1), à la base (8) de la coque creuse.
4. Structure vibrante selon la revendication 3, caractérisée en ce que l'épaisseur (e) de la paroi latérale de la coque creuse varie linéairement entre l'extrémité libre (9) et la base (8) de la coque creuse.
5. Structure vibrante selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisée en ce que la face externe de la paroi latérale de la coque creuse est cylindrique.

6. Structure vibrante selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisée en ce que la face externe de la paroi latérale de la coque creuse est tronconique.
7. Structure vibrante selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, caractérisée en ce que la base (8) de la paroi latérale de la coque creuse a une épaisseur (e, e2) prédéterminée et une section circulaire de rayon (R, R2) prédéterminé.
8. Structure vibrante selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, caractérisée en ce que la base (8) de la paroi latérale de la coque creuse a une épaisseur (e, e2) prédéterminée et une section en forme d'ellipse.
9. Structure vibrante selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, caractérisée en ce que la paroi vibrante (7) est réalisée dans un substrat (10) en silicium.
10. Structure vibrante selon la revendication 9, caractérisée en ce que le support fixe (6) est réalisé dans le même substrat (10).
11. Structure vibrante selon la revendication 9, caractérisée en ce que le support fixe (6) est constitué par une couche surdopée (11) du substrat (10).
12. Structure vibrante selon la revendication 9, caractérisée en ce que le support fixe (6) est constitué par une couche d'oxyde de silicium (12) formée sous le substrat (10).

**13.** Structure vibrante selon la revendication 9, caractérisée en ce que le support fixe (6) est constitué par une couche (13) d'oxyde de silicium enterrée dans le substrat (10).

**14.** Microgyromètre caractérisé en ce qu'il comporte au moins une structure vibrante selon l'une quelconque des revendications 1 à 13, et des électrodes (15) formées dans le même substrat (10) que la paroi vibrante (7) de la structure vibrante (4).

**15.** Microgyromètre selon la revendication 14, caractérisé en ce qu'il comporte deux structures vibrantes (4a) et (4b) disposées symétriquement et scellées par leurs supports fixes (6) respectifs.

1/8

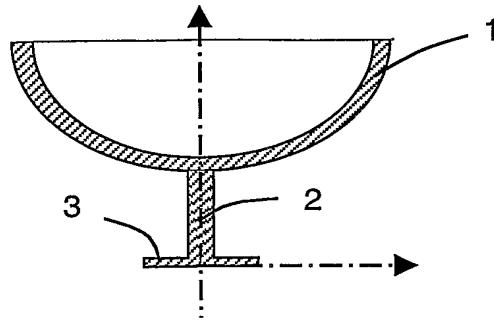


FIG. 1 (art antérieur)

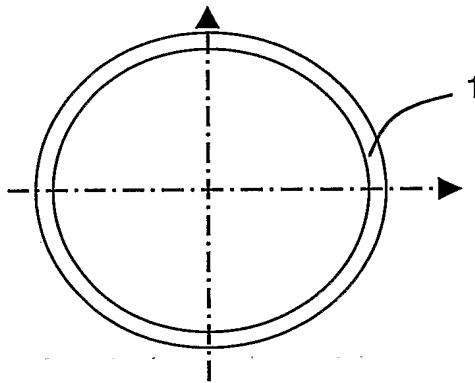


FIG. 2 (art antérieur)

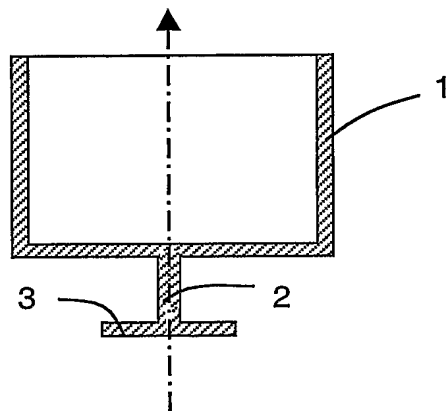


FIG. 3 (art antérieur)

2/8

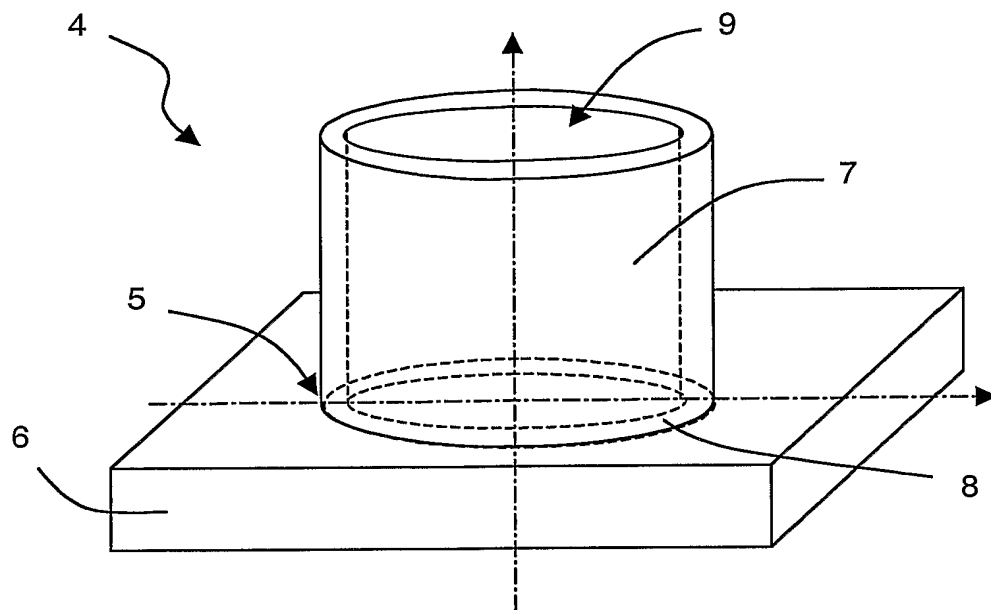


FIG. 4

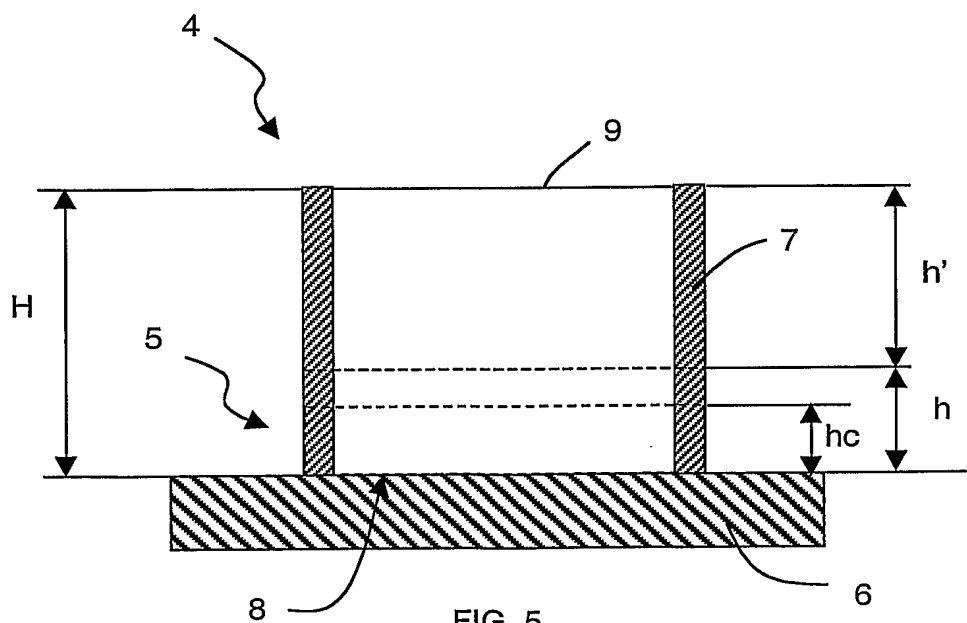
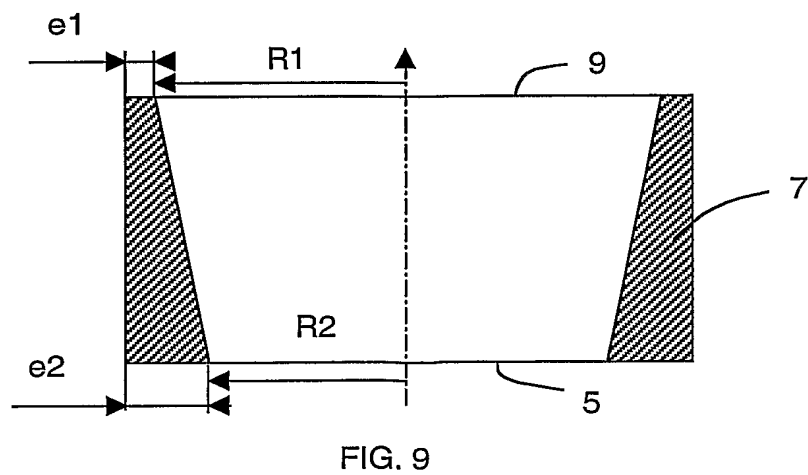
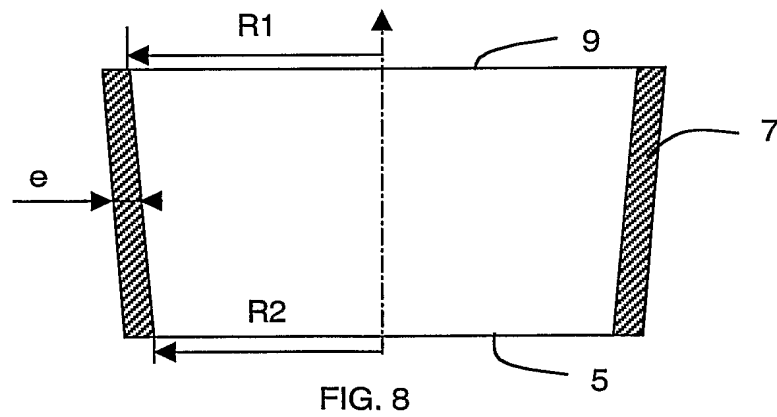
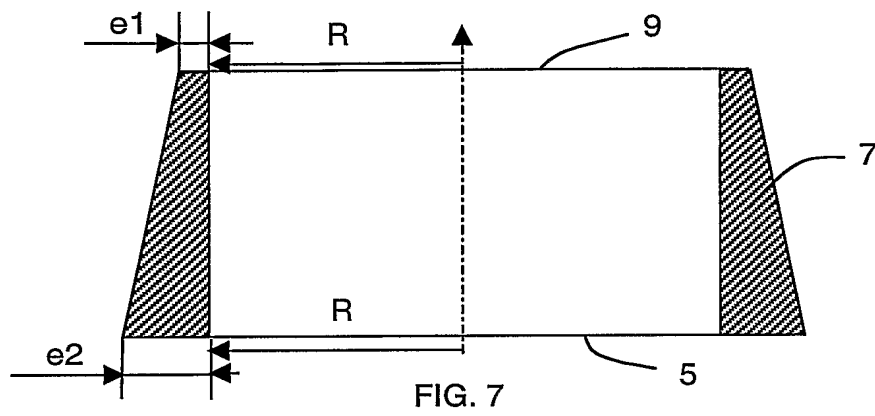
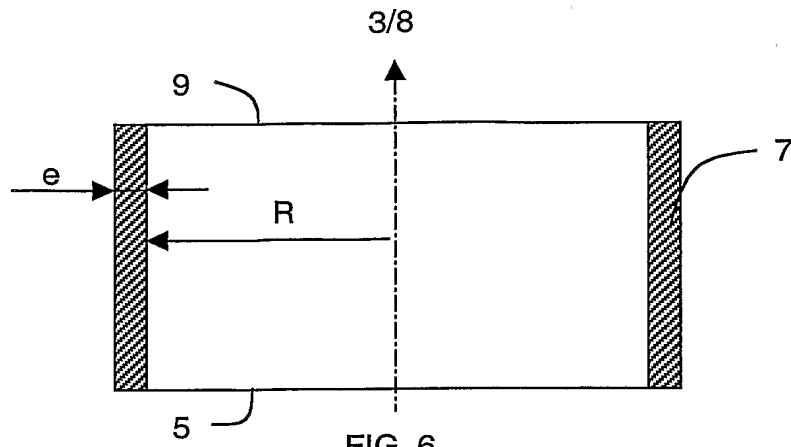


FIG. 5





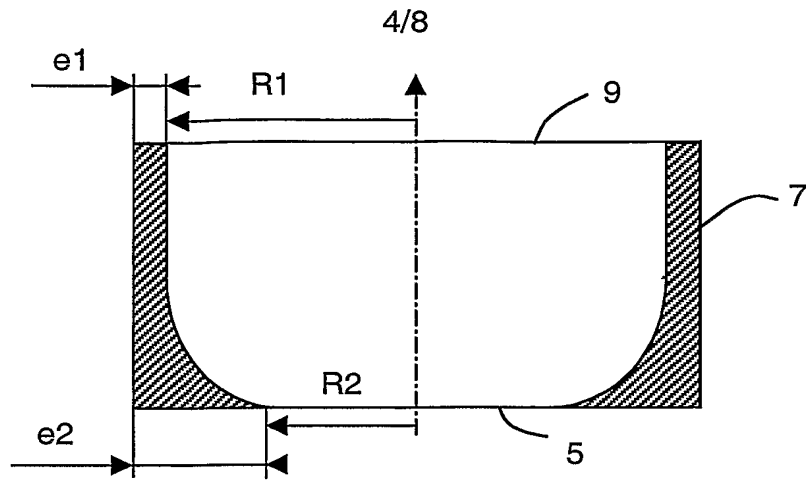


FIG. 10

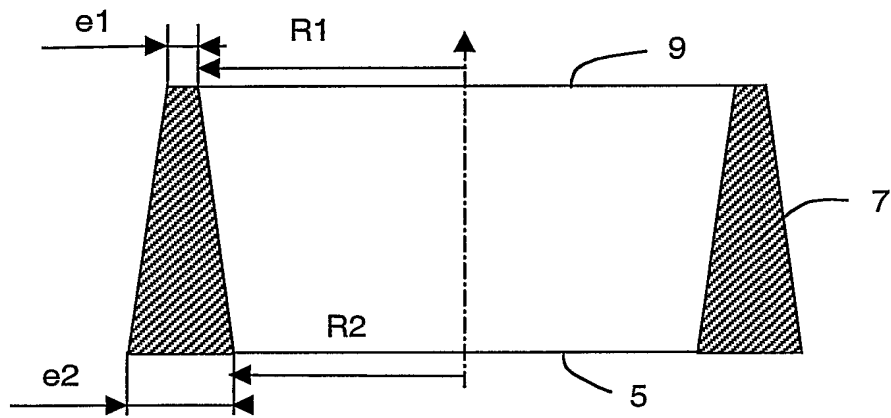


FIG. 11

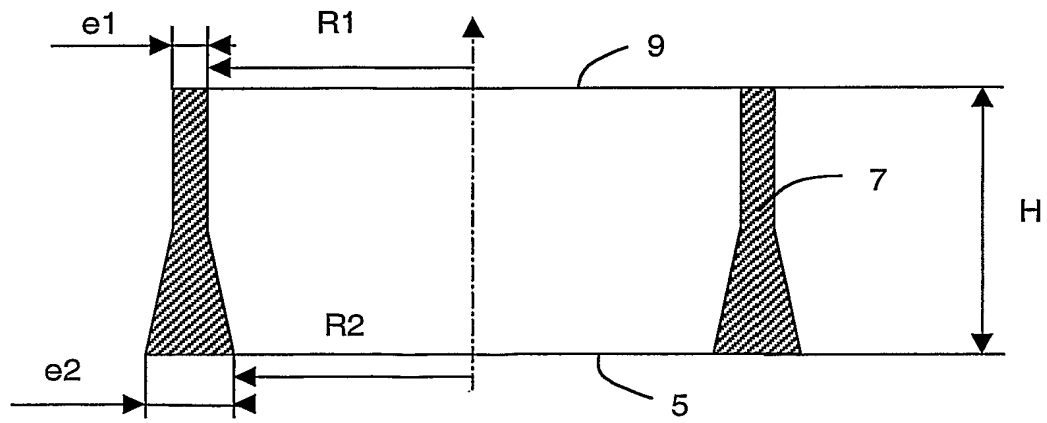


FIG. 12

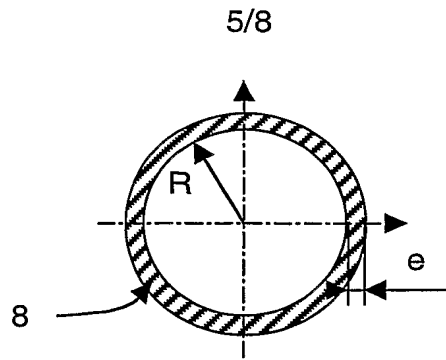


FIG. 13

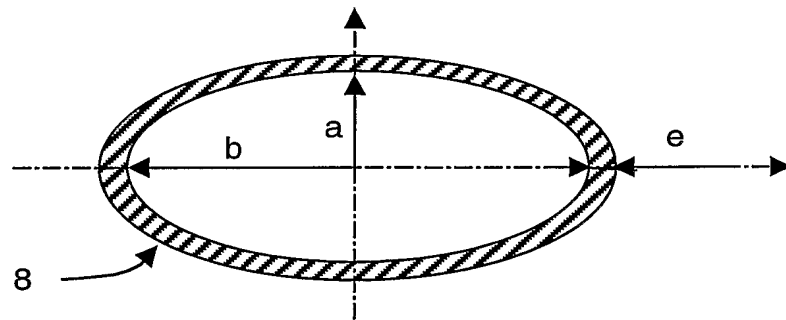


FIG. 14

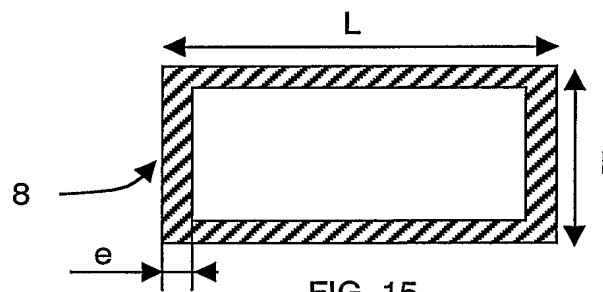
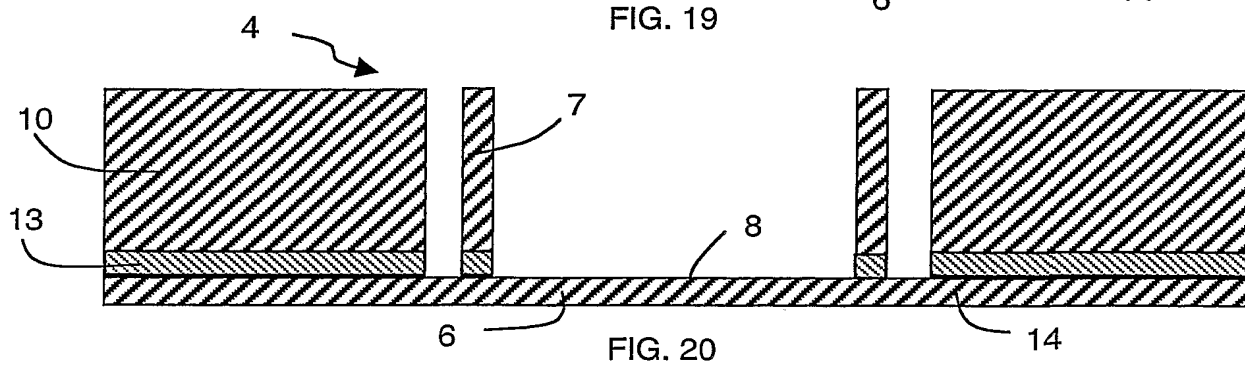
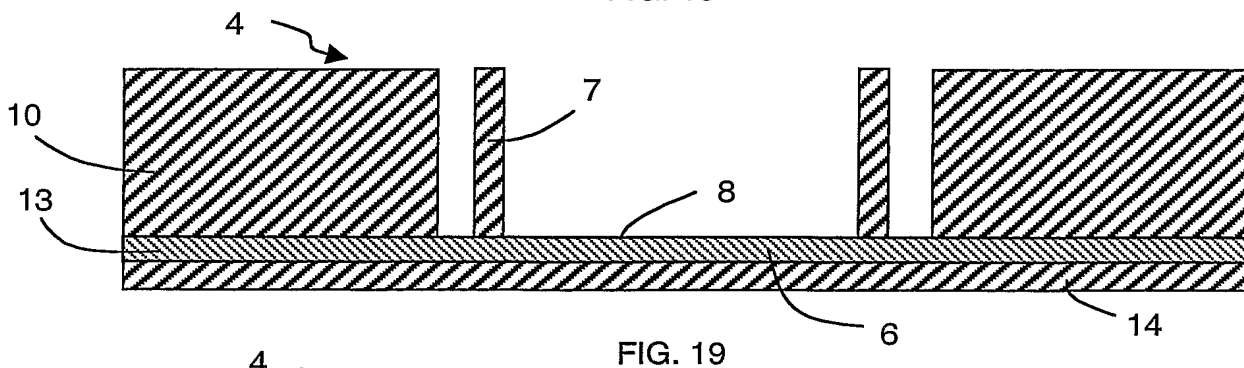
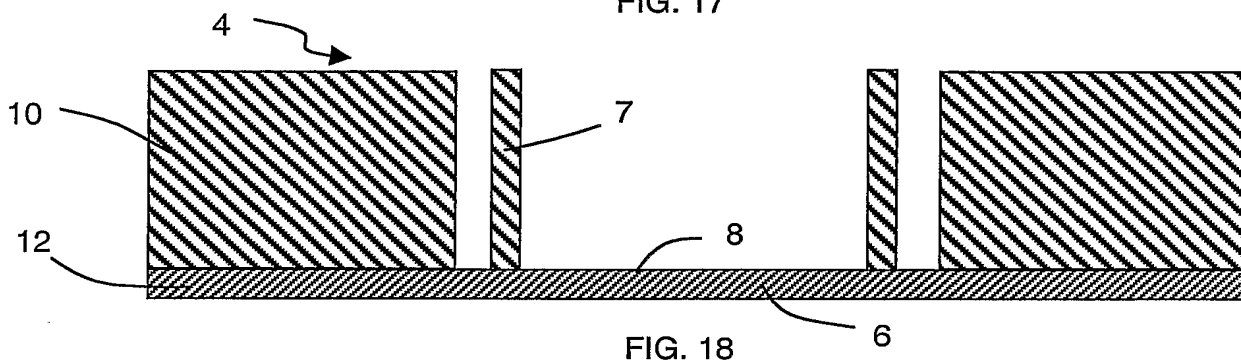
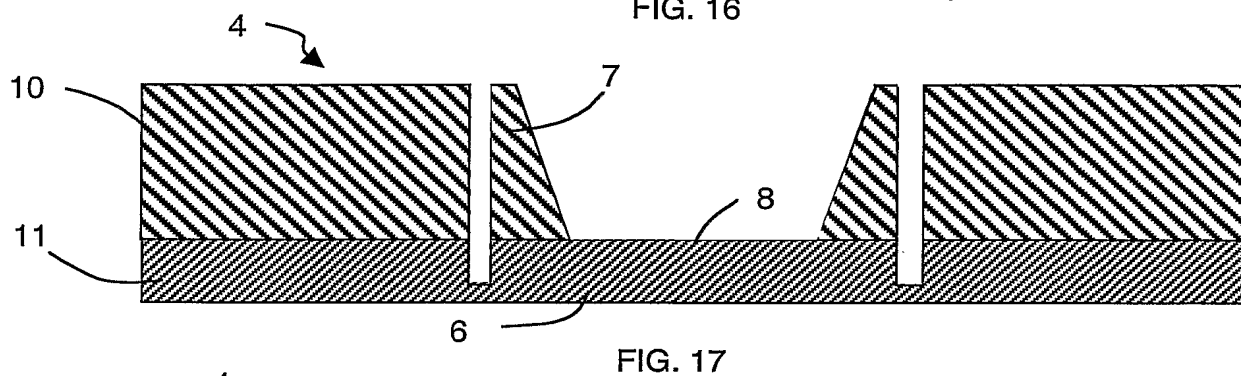
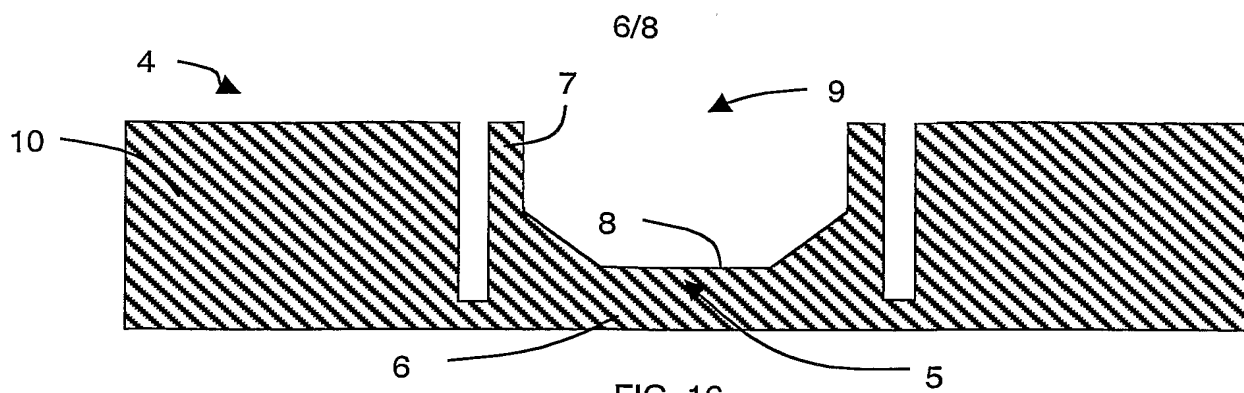
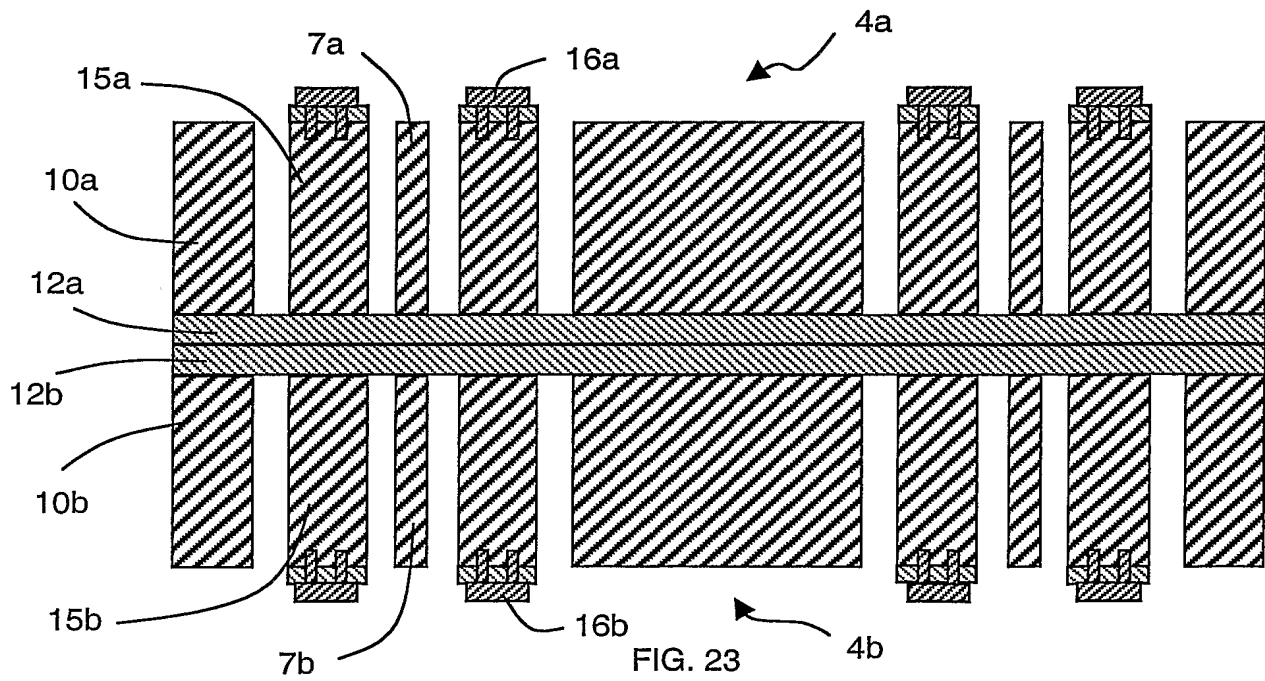
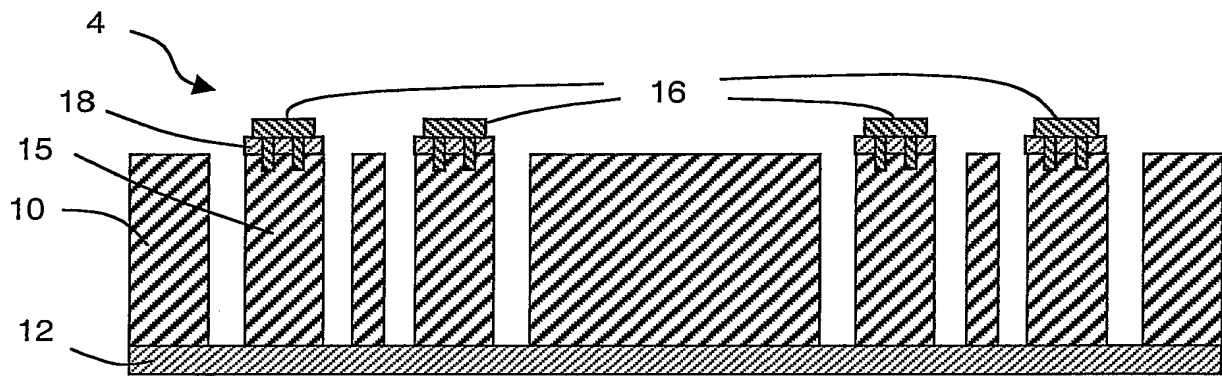
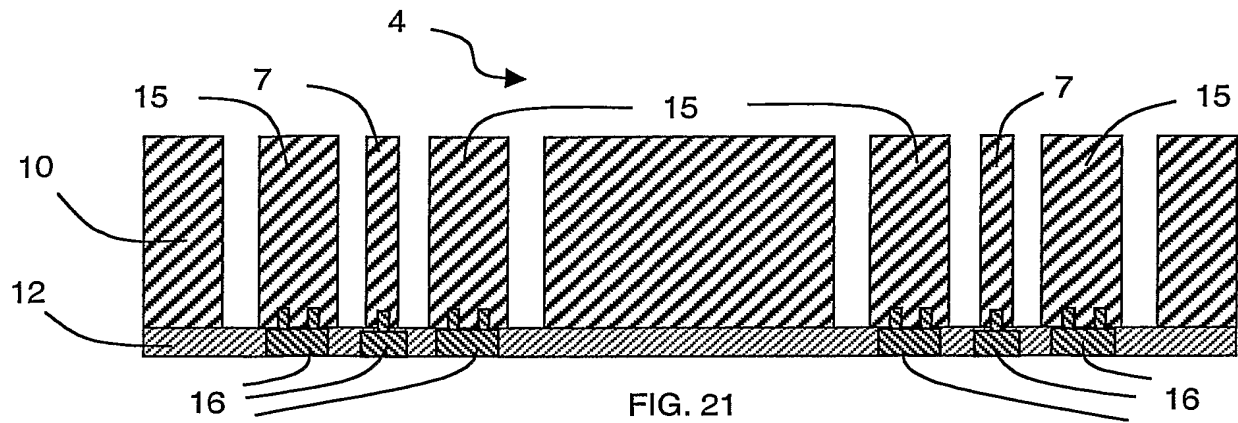
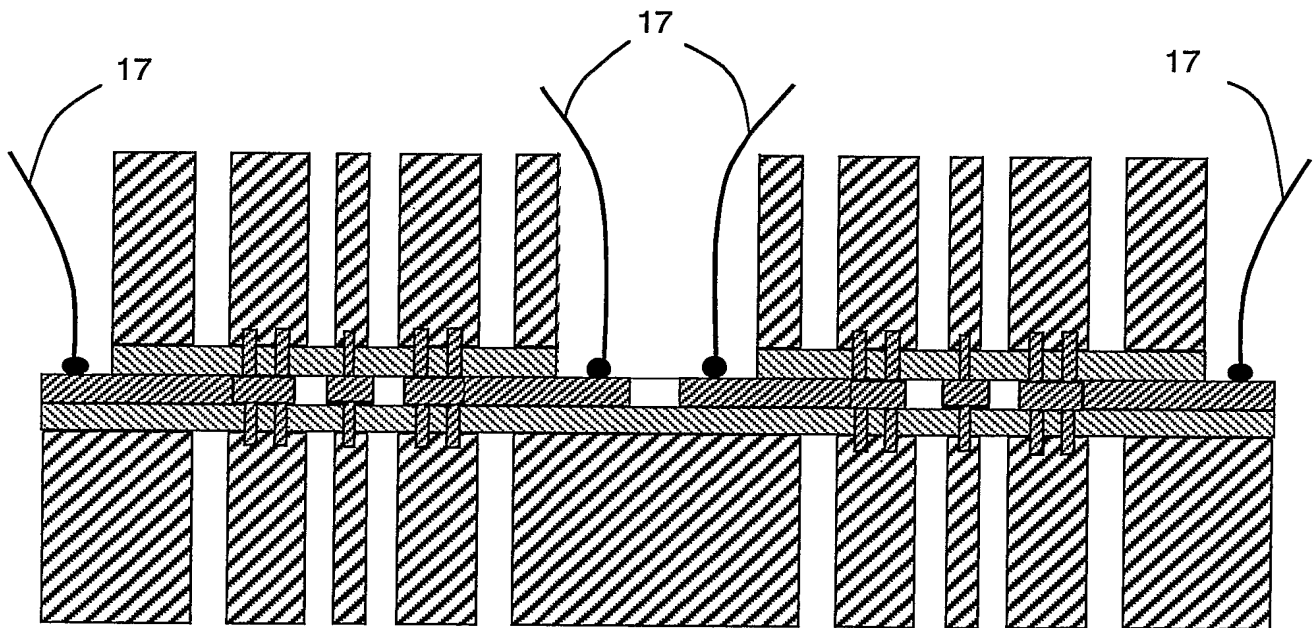
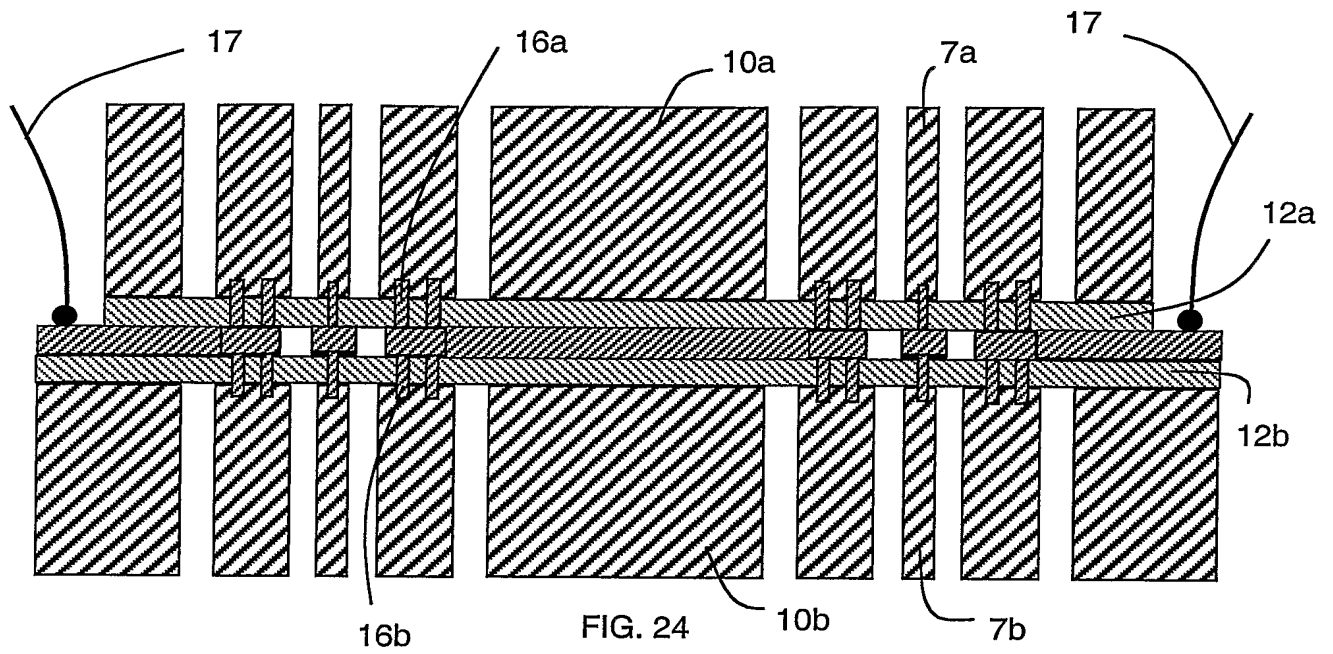


FIG. 15



7/8





# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No  
PCT/FR2004/003203

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

IPC 7 G01C19/56 B81B3/00 H03H9/24

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 7 G01C B81B H03H

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data, PAJ

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	EP 0 904 522 A (ALLIED SIGNAL INC) 31 March 1999 (1999-03-31) column 1, paragraph 2 - paragraph 5 column 3, paragraph 11 - column 4, paragraph 12 column 4, paragraph 17 - column 5, paragraph 17 figures 1-3,5	1-15
A	WO 02/057728 A (HONEYWELL INT INC) 25 July 2002 (2002-07-25) the whole document	1
A	EP 1 126 242 A (BOSCH GMBH ROBERT) 22 August 2001 (2001-08-22) the whole document	1



Further documents are listed in the continuation of box C.



Patent family members are listed in annex.

\* Special categories of cited documents:

- \*A\* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- \*E\* earlier document but published on or after the international filing date
- \*L\* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- \*O\* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- \*P\* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

- \*T\* later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- \*X\* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- \*Y\* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.
- \* & \* document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

2 May 2005

Date of mailing of the international search report

17/05/2005

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Yosri, S

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No

PCT/FR2004/003203

Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)	Publication date
EP 0904522	A	31-03-1999	US 5656777 A	12-08-1997
			DE 69726142 D1	18-12-2003
			DE 69726142 T2	22-07-2004
			EP 0904522 A1	31-03-1999
			JP 2000512019 T	12-09-2000
			WO 9747944 A1	18-12-1997
WO 02057728	A	25-07-2002	EP 1352222 A1	15-10-2003
			WO 02057728 A1	25-07-2002
			US 2002125791 A1	12-09-2002
EP 1126242	A	22-08-2001	US 6443008 B1	03-09-2002
			EP 1126242 A2	22-08-2001
			JP 2001255153 A	21-09-2001

# RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Document International No

PCT/FR2004/003203

## A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE

CIB 7 G01C19/56 B81B3/00 H03H9/24

Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB

## B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE

Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement)

CIB 7 G01C B81B H03H

Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche

Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si réalisable, termes de recherche utilisés)

EPO-Internal, WPI Data, PAJ

## C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie °	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	EP 0 904 522 A (ALLIED SIGNAL INC) 31 mars 1999 (1999-03-31) colonne 1, alinéa 2 - alinéa 5 colonne 3, alinéa 11 - colonne 4, alinéa 12 colonne 4, alinéa 17 - colonne 5, alinéa 17 figures 1-3,5	1-15
A	WO 02/057728 A (HONEYWELL INT INC) 25 juillet 2002 (2002-07-25) le document en entier	1
A	EP 1 126 242 A (BOSCH GMBH ROBERT) 22 août 2001 (2001-08-22) le document en entier	1

☐ Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents

☒ Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe

° Catégories spéciales de documents cités:

- \*A\* document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent
- \*E\* document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date
- \*L\* document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)
- \*O\* document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens
- \*P\* document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée

- \*T\* document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention
- \*X\* document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément
- \*Y\* document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier
- \*Z\* document qui fait partie de la même famille de brevets

Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée

2 mai 2005

Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale

17/05/2005

Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale

Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
Fax: (+31-70) 340-3016

Fonctionnaire autorisé

Yosri, S



# RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Dem. de Internationale No

PCT/FR2004/003203

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
EP 0904522	A	31-03-1999	US 5656777 A	12-08-1997
			DE 69726142 D1	18-12-2003
			DE 69726142 T2	22-07-2004
			EP 0904522 A1	31-03-1999
			JP 2000512019 T	12-09-2000
			WO 9747944 A1	18-12-1997
WO 02057728	A	25-07-2002	EP 1352222 A1	15-10-2003
			WO 02057728 A1	25-07-2002
			US 2002125791 A1	12-09-2002
EP 1126242	A	22-08-2001	US 6443008 B1	03-09-2002
			EP 1126242 A2	22-08-2001
			JP 2001255153 A	21-09-2001